

ANOMALI GAS RADON SEBAGAI PREKURSOR GEMPABUMI DI SEKITAR SESAR PALUKORO

Sulastri^{1)*}, Saskia Nursarifa²⁾, Bambang Sunardi³⁾, Supriyanto Rohadi⁴⁾, Cahyo Nugroho⁵⁾, Yusuf Hadi Perdana⁶⁾.

^{1,3,4,6)} Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika

²⁾ Program Studi Geofisika, Universitas Indonesia

⁵⁾ Stasiun Geofisika Palu, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika

*Korespondensi: sulastri@bmet.go.id

ABSTRACT

Radon gas concentration anomalies before the occurrence of earthquakes have been detected in many major earthquake cases in the world, so they can be considered as early signs or earthquake precursors. The BMKG has installed a radon gas concentration measuring device equipped with gauges of air pressure, air temperature, and rainfall around the Palukoro Fault, namely at the Tadulako Earthquake Precursor Station. This study aims to determine the existence of earthquake precursors around the Palukoro Fault recorded by the Tadulako Precursor Station, by utilizing the radon and air pressure sensors installed at the station. The data used are radon data and air pressure data in 2016 as well as data on earthquake events that occurred around the Palukoro Fault in the same year. The data analysis method was carried out in three stages. First, the selection of an earthquake with a certain distance from Tadulako, where the possibility of the radon precursor can still be detected. Second, analysis of radon data anomalies using statistical methods, namely outside the mean ± 2 standard deviations, and looking at earthquake data that corresponds to the radon anomaly. Third, selecting radon anomalies which are considered as earthquake precursors whose rate of change is inversely proportional to the rate of change in air pressure. The analysis results show 9 radon gas anomalies detected in the second step and 4 radon gas anomalies that fulfill the third step. This method needs to be tested on radon and air pressure data from BMKG precursor stations elsewhere.

Keywords: earthquake, precursor, anomaly, radon, Palu

ABSTRAK

Anomali konsentrasi gas radon sebelum kejadian gempa bumi telah terdeteksi dalam banyak kasus gempa bumi besar di dunia sehingga dapat dipertimbangkan sebagai tanda-tanda awal / prekursor gempa bumi. Alat pengukur konsentrasi gas radon yang dilengkapi dengan pengukur tekanan udara, suhu udara, dan curah hujan telah dipasang BMKG di sekitar Sesar Palukoro, yaitu di Stasiun Prekursor Gempabumi Tadulako. Penelitian ini bertujuan untuk melihat adanya prekursor gempa bumi di sekitar Sesar Palu Koro yang terekam oleh Stasiun Prekursor Tadulako, dengan memanfaatkan sensor radon dan tekanan udara yang terpasang di stasiun tersebut. Data yang dipakai adalah data radon dan data tekanan udara tahun 2016 serta data kejadian gempa bumi dari yang terjadi di sekitar Sesar Palukoro pada tahun yang sama. Analisis data dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, pemilihan gempa bumi dengan jarak tertentu dari Stasiun Prekursor Tadulako, dimana kemungkinan prekursor radon masih bisa terdeteksi. Kedua, analisis anomali data radon dengan metode statistik, yaitu diluar mean ± 2 standar deviasinya, dan melihat data gempa bumi yang bersesuaian dengan anomali radon tersebut. Ketiga, memilih anomali radon yang dipertimbangkan sebagai prekursor gempa bumi yang laju perubahannya berbanding terbalik dengan laju perubahan tekanan udara. Hasil analisis menunjukkan 9 anomali gas radon yang terdeteksi pada langkah kedua dan 3 anomali gas radon yang memenuhi langkah ketiga. Metode ini perlu diuji pada data radon dan tekanan udara dari stasiun prekursor BMKG di tempat lain.

Kata kunci: gempa bumi, prekursor, anomali, radon, Palu

PENDAHULUAN

Gempabumi merupakan salah satu bencana alam yang terjadi secara tiba-tiba dan dapat menyebabkan korban dan kerugian yang

besar (Chetiaa, 2020). Gempabumi berhubungan dengan perubahan fisis pada permukaan dan bawah permukaan bumi. Gempabumi yang tampaknya terjadi secara mendadak tersebut, pada sebagian kasus

memiliki tanda-tanda awal (prekursor) sebelum kejadian. Laporan terkait adanya prekursor gempabumi mulai zaman Yunani Kuno hingga sekarang telah banyak dikemukakan (Hayakawa & Hobara, 2010; Molchanov dan Hayakawa, 2008; Uyeda, 2008; Rikitake, 2001).

Penelitian-penelitian terkait prekursor gempabumi menggunakan berbagai pendekatan telah banyak dilakukan. Beberapa anomali respon fisis yang dijadikan prekursor gempabumiantara lain dari parameter geomagnetik, EM (Elektromagnetik), radon, TEC (Total Electron Content), water level, dan lain-lain.

Penelitian terkait geomagnetik sebagai prekursor gempabumi telah banyak dilakukan antara lain oleh Ibrahim, et al. (2012); Hayakawa, et al. (2007); Hayakawa, et al. (2000); Hattori, et al. (2006); Ahadi, et al. (2015, Ahadi, et al. (2014), dan Ahadi, et al. (2013). Penggunaan TEC untuk menemukan prekursor gempabumi juga telah banyak dilakukan baik oleh peneliti di luar negeri maupun dalam negeri (Pulinet, 1994; Pulinet, 1998; Pulinet, 2000; Pulinet, 2002; Pulinet, 2004; Liu, 1996; Liu, 2000; Liu, 2001; Liu, 2002; Muslim, 2015; Sunardi, 2018a, Sunardi & Sulastri, 2016; Sunardi, 2015).

Radon merupakan salah satu prekursor yang terbukti kemunculannya dalam banyak kasus gempabumi. Anomali prekursor radon yang terkenal telah diamati sebelum gempa Izu-Oshima-kinkai pada 1978 dan gempa Kobe pada 1995 (Wakita, et al, 1996; Wakita et al., 1980; Igarashi et al., 1995). Anomali konsentrasi radon telah dilaporkan terjadi sebelum gempabumi Tonankai pada Desember 1944 dengan magnitude 8 (Hatuda, 1953). Pada gempabumi Tashkent 1966, konsentrasi gas radon juga mengalami kenaikan sebelum kejadian gempabumi tersebut (Ulomov, 1967). Anomali radon juga tercatat sebelum gempabumi Nagano 1984 (Hirotaka, 1988).

Di Indonesia, studi terkait radon untuk prekursor gempabumi juga telah dilakukan dengan memanfaatkan data dari stasiun prekursor gempabumi di Pundong dan

Piyungan, Bantul, DIY (Sunardi, 2018b; Sunardi, 2016; Prayogo, 2017). Penelitian terkait parameter radon dan elektromagnetik kaitannya dengan kejadian gempabumi di sekitar Pelabuhan Ratu juga telah beberapa kali dilakukan (Pakpahan, 2014; Prayogo, 2015)

Gempa bumi bagi sebagian masyarakat dianggap sebagai bencana alam yang tidak dapat diprediksi kedatangannya. Hal ini menjadi sebuah tantangan bagi para ilmuwan di bidang kebumihan, termasuk di Indonesia yang memiliki potensi bencana gempabumi yang tinggi. Tingginya potensi gempabumi di Indonesia salah satunya disebabkan oleh keberadaan sesar-sesar aktif.

Kota Palu merupakan daerah yang berada pada jalur sesar aktif Palu Koro. Gempabumi sering terjadi di wilayah ini akibat aktivitas patahan tersebut. Stasiun prekursor gempabumi telah dibangun di Tadulako, daerah yang berdekatan dengan jalur Sesar Palu Koro. Stasiun prekursor ini dilengkapi dengan sensor yang dapat merekam data konsentrasi radon, tekanan udara, suhu udara, curah hujan, suhu tanah, dan water level. Kaitan konsentrasi gas radon dengan aktivitas kegempaan di sekitar Sesar Palu koro menjadi fokus dalam penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat adanya prekursor gempabumi yang bersumber di sekitar Sesar Palu Koro yang terekam oleh Stasiun Prekursor Tadulako, dengan memanfaatkan sensor radon dan tekanan udara yang terpasang di stasiun tersebut.

KAJIAN PUSTAKA

Zona sesar aktif umumnya memiliki permeabilitas yang lebih tinggi dibanding wilayah sekitarnya, karena itu memungkinkan terciptanya saluran-saluran untuk gas yang berasal dari kerak atau mantel dalam untuk bermigrasi menuju permukaan (Fu, et al., 2017).

Mekanisme gas radon sebagai prekursor gempabumi dapat dijelaskan menggunakan model *dilatancy* (Scholz, 1973). Menurut teori, deformasi maksimum batuan

dapat terjadi sebelum kejadian gempa bumi, hal ini dapat menghasilkan retakan-retakan mikro. Model *dilatancy* menunjukkan bahwa anomali radon terkait dengan terciptanya retakan-retakan mikro sebelum kejadian gempa bumi. Selama tahap pembentukan regangan elastis, retakan-retakan mikro yang tercipta akan diisi dengan gas dan cairan dari lingkungannya. Radon yang berasal dari butiran batuan menjadi salah satu gas yang disimpan di ruang pori, yang dapat bermigrasi ke permukaan bersama gas lainnya. Akibatnya, konsentrasi radon bisa meningkat yang pada akhirnya dapat ditangkap oleh sensor radon sebagai nilai konsentrasi yang lebih tinggi.

Saat terjadi gempa bumi, energi regangan elastis yang tersimpan di batuan dilepaskan. Oleh karena itu, retakan-retakan mikro akan kembali ke keadaan semula, demikian juga konsentrasi gas radon juga kembali ke tingkat semula (Li et al., 2006; Fielding et al., 2008; Mair & Abe, 2008; Fu et al., 2017).

Beberapa penelitian mengungkapkan anomali gas radon yang terjadi juga dapat dipengaruhi oleh parameter meteorologi, seperti tekanan atmosfer, kelembaban, suhu, angin, maupun curah hujan (Iakovleva & Ryzhakova, 2003; Fu et al., 2017; Gregoric et al., 2012). Penurunan pada tekanan barometer, dengan parameter lainnya konstan, biasanya akan menyebabkan kenaikan konsentrasi radon yang dilepaskan ke udara, sementara jika terjadi kenaikan tekanan barometer, udara dengan konsentrasi radon rendah akan masuk ke tanah, sehingga radon di dalam tanah cenderung turun. Pada saat terjadi gempa bumi, tekanan udara mengalami peningkatan, yang diikuti dengan peningkatan konsentrasi radon, dikarenakan deformasi batuan mengakibatkan peluruhan radon yang drastis.

METODE

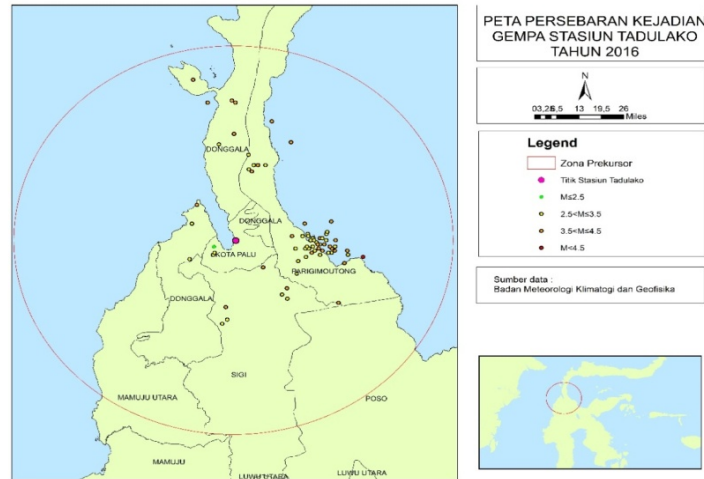
Untuk menganalisis keberadaan prekursor gempa bumi, data yang paling penting adalah gempa bumi itu sendiri. Dalam studi ini, data gempa bumi yang digunakan adalah gempa bumi yang terjadi pada tahun 2016 di sekitar Sesar Palukoro dengan jarak maksimal 100 km dari Stasiun Prekursor Tadulako. Sebaran data gempa bumi dari BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) dapat dilihat pada Gambar 1. Radius 100 km merupakan zona prekursor, yaitu jarak maksimal gempa bumi dari titik observasi. Namun demikian, tidak semua gempa bumi yang berada pada zona prekursor tersebut didahului oleh prekursor radon, tergantung dari magnitudo dan juga jarak dari titik observasi.

Gempa bumi yang kemungkinan didahului oleh prekursor radon adalah gempa bumi yang berada pada zona radius toleransi prekursor, yaitu yang memenuhi detektor Hauksson dan Goddard (Hauksson dan Goddard, 1981), yang dinyatakan dengan persamaan (1).

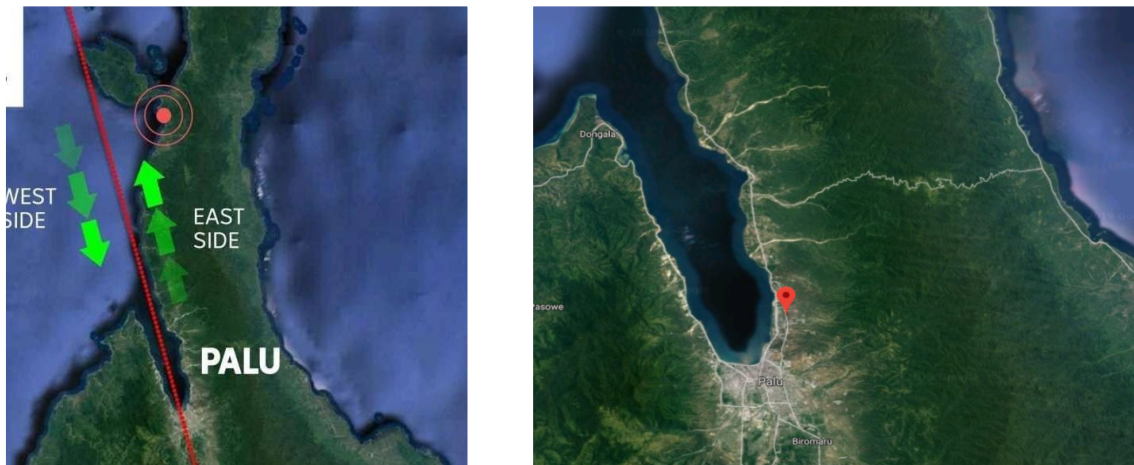
$$M \geq 2.4 \log_{10} D - 0.43 \quad (1)$$

dengan M adalah magnitudo gempa bumi dan D adalah radius toleransi prekursor.

Data radon dan tekanan udara direkam di Stasiun Prekursor Tadulako, yang terletak pada koordinat 119.89° BT dan 0.842° LS, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Stasiun Prekursor Tadulako mencatat data setiap 1 menit dengan format data mencantumkan tanggal, waktu, dan hasil pengukuran sensor, antara lain *pressure* (tekanan udara), *rainfall* (curah hujan), suhu udara, *geotemperature* (suhu tanah), radon, *water level*, dan nilai voltase alat.



Gambar 1. Gempabumi tahun 2016 yang berada dalam zona prekursor dengan jarak maksimal 100 km dari Stasiun Prekursor Tadulako (Sumber: BMKG)



Gambar 2. Letak Sesar Palu Koro di sekitar Kota Palu, ditunjukkan dengan garis merah (kiri), dan letak Stasiun Prekursor Tadulako (kanan)

Nilai voltase digunakan untuk konfirmasi data, pada saat data bernilai 0 (nol) apakah terjadi penurunan daya listrik atau tidak. Jika nilai voltase alat nol, maka data pada waktu tersebut tidak digunakan dan dianggap tidak valid. Pada penelitian ini, data hasil pengukuran yang digunakan adalah data radon tahun 2016 dengan resolusi per jam (satu data radon setiap jamnya atau 24 data per hari). Analisis juga dilakukan terhadap data tekanan udara pada tahun yang sama.

Alat dapat bekerja dengan baik selama tahun 2016. Data yang kurang valid ditemukan di Bulan Januari 2016, yaitu pada tanggal 1

Januari jam 15.00 sampai 5 Januari jam 23.00 dan tanggal 19 Januari jam 16.00 sampai 20 Januari jam 08.00. Kemungkinan disebabkan daya listrik yang kurang baik.

Dari data radon per jam yang sudah ada, kemudian dibuat grafik setiap bulan. Dengan melihat grafik radon tersebut, kemudian dibuat klaster atau kelompok data berdasarkan sebaran nilainya. Setiap kelompok data dibuat nilai normal data radon, dimana persebaran nilai radon pada kondisi normal pada rentang rata-rata ± 2 kali standar deviasi sesuai persamaan (2).

$$\text{Normal Radon} = \text{mean} \pm 2 \text{SD} \quad (2)$$

dengan *SD* adalah deviasi standar-nya. Nilai data anomali pada radon adalah nilai diluar nilai normal radon diatas, yaitu nilai radon yang melebihi $\text{mean} + 2 \text{SD}$ dan kurang dari $\text{mean} - 2 \text{SD}$ (Igarashi dan Wakita, 1990). Selanjutnya dilihat apakah anomali pada radon tersebut diikuti oleh gempa bumi atau tidak pada beberapa hari sesudahnya. Anomali radon yang diikuti dengan gempa bumi sesudahnya dapat dikategorikan sebagai prekursor gempa bumi.

Setelah dilakukan metode pencarian anomali menggunakan metode standar deviasi, selanjutnya dibandingkan antara perubahan konsentrasi radon dengan perubahan tekanan udara per satuan waktu. Satuan waktu yang dipakai disini adalah harian. Anomali terjadi bila perubahan konsentrasi radon sebanding (tidak berkebalikan) dengan perubahan tekanan udara. Jika anomali ini juga terjadi, maka dapat menambah tingkat kepercayaan kita bahwa

anomali radon yang terjadi memang merupakan prekursor gempa bumi..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat 92 kejadian gempa bumi selama tahun 2016 yang termasuk dalam zona prekursor, yaitu berjarak 100 km dari Stasiun Prekursor Tadulako (Gambar 1). Dari 92 kejadian gempa bumi ini, 24 kejadian dengan magnitudo dibawah 3, 59 kejadian dengan magnitudo 3-4, 8 kejadian dengan magnitudo 4-5, dan hanya 1 kejadian dengan magnitudo lebih dari 5.

Setelah dihitung zona toleransi prekursor untuk masing – masing gempa bumi menggunakan persamaan (1), hanya 17 kejadian gempa bumi yang termasuk dalam zona toleransi prekursor, yaitu memenuhi persamaan (1). Data dari 17 kejadian gempa bumi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kejadian gempa bumi di sekitar Sesar Palukoro yang termasuk dalam Zona Toleransi Prekursor (Sumber: BMKG)

No	Tanggal dan Waktu (UTC)	Lintang (°)	Bujur (°)	Depth (km)	Magnitudo	Distance (km)
1	1/6/2016 18:09	-0.82	120.17146	10	2.64	31.46
2	1/13/2016 6:23	-0.51	119.95792	10	4.1	37.41
3	2/19/2016 1:59	-0.67	119.72621	12.9	4	26.34
4	2/29/2016 15:22	-1.07	120.10528	10	3.6	34.92
5	3/23/2016 10:49	-0.48	119.98352	12.1	4.3	41.26
6	3/24/2016 14:34	-1.22	119.85326	10	2.9	42.04
7	4/3/2016 10:54	-0.91	119.79414	16.7	3	13.14
8	4/22/2016 20:21	-0.87	119.79794	10	2.2	10.7
9	5/1/2016 13:38	-0.9	119.80101	18.6	3.1	11.86
10	7/12/2016 1:37	-0.97	120.00533	10	3.7	19.13
11	8/7/2016 12:18	-1.24	119.83205	12.6	2.8	44.56
12	8/27/2016 18:03	-0.37	120.12266	10	4	58.35
13	8/30/2016 15:50	-1	120.14639	10.2	3.5	33.52
14	9/7/2016 14:32	-0.92	120.42582	10	5.01	60.42
15	9/9/2016 4:39	-0.89	120.35977	10	4.4	52.72
16	9/28/2016 21:07	-0.84	120.31039	12.4	4.3	46.75
17	12/29/2016 7:53	-0.93	119.69548	18	3.4	23.71

Data radon selama tahun 2016 dikelompokkan dari Januari hingga Desember. Terdapat beberapa data yang kurang valid di

bulan Januari 2016 yang kemungkinan dikarenakan kondisi listrik yang kurang bagus, sehingga data radon di bulan Januari 2016 tidak

dianalisis. Grafik data radon dari Februari-Mei 2016 disajikan pada Gambar 3, grafik data radon dari Juni-Oktober 2016 disajikan pada Gambar 4, dan grafik data radon bulan November-Desember 2016 disajikan pada Gambar 5. Dari Gambar dapat diketahui gempa bumi yang diperkirakan didahului oleh prekursor radon. Terdapat 3 bulan yaitu Juni, Oktober, dan November 2016 dimana pada bulan tersebut tidak terjadi gempa bumi.

Gempa bumi di bulan Februari 2016, tanggal 19 dan 29 dengan magnitudo 4 dan 3.6 dan jarak episenter 26.34 dan 34.92 km, ditengarai didahului oleh anomali radon. Demikian juga dua gempa bumi di bulan Maret dan dua gempa bumi di bulan April 2016, gempa bumi di bulan Juli dan dua gempa bumi di bulan Agustus 2016. Gempa bumi yang terjadi di awal Mei 2016 kemungkinan prekursor radon terjadi di akhir April. Sementara itu, gempa bumi yang tidak didahului dengan prekursor adalah gempa bumi pada tanggal 7 Agustus, 3 gempa bumi di bulan September, serta 1 gempa bumi di bulan Desember 2016. Total sebanyak 5 gempa bumi tidak didahului oleh adanya anomali radon.

Selanjutnya, akan dilihat apakah juga terjadi anomali pada pola perubahan radon dan tekanan udara per hari. Data yang akan dilihat anomalnya adalah data yang terjadi anomali radon, yaitu bulan Februari, Maret, April, Mei, Juli, dan Agustus 2016.

Dua hari sebelum gempa bumi tanggal 29 Februari 2016, terjadi anomali pada grafik perubahan radon dan tekanan udara per harinya. Anomali ini berlanjut hingga 3 hari setelah gempa bumi terjadi (Gambar 6). Dapat disimpulkan bahwa gempa bumi tanggal 29 Februari 2016 didahului oleh anomali radon dan juga anomali perubahan harian radon dan tekanan udara.

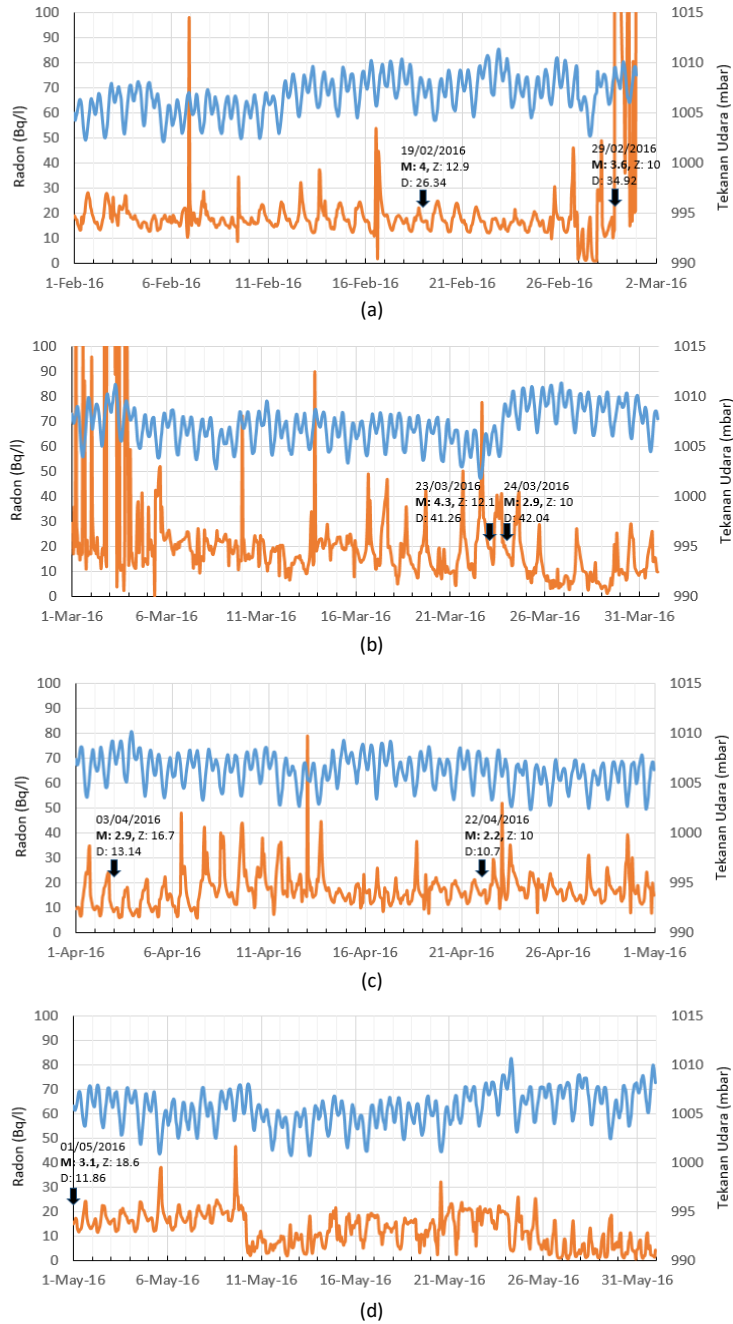
Selanjutnya adalah perubahan radon dan tekanan udara harian pada bulan Maret 2016 (Gambar 7). Dari grafik terlihat adanya kenaikan konsentrasi radon pada saat

gempa bumi tanggal 23 dan 24 Maret 2016. Akan tetapi, anomali perubahan radon dan tekanan udara per hari terjadi pada 14 hari sebelumnya dan anomali ini berhenti 3 hari sebelum terjadinya gempa bumi tanggal 23 Maret 2016. Anomali perubahan harian radon dan tekanan udara yang terjadi ini tidak jelas apakah karena gempa bumi tanggal 23 atau tanggal 24 Maret 2016, namun karena jarak dari stasiun prekursor dan kedalaman gempa bumi hampir sama, namun magnitudo gempa 23 Maret 2016 lebih besar, maka anomali ini bisa dianggap merupakan prekursor gempa bumi tanggal 23 Maret 2016.

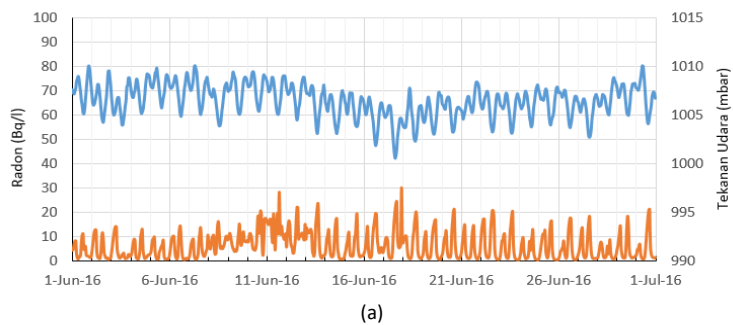
Pada gempa bumi tanggal 3 April 2016, tidak ada anomali pada perubahan radon dan tekanan udara harian yang terjadi sebelum gempa bumi (Gambar 8). Hal yang sama juga terjadi pada gempa bumi yang terjadi pada tanggal 1 Mei 2016 (Gambar 9) dan gempa bumi pada tanggal 12 Juli 2016 (Gambar 10).

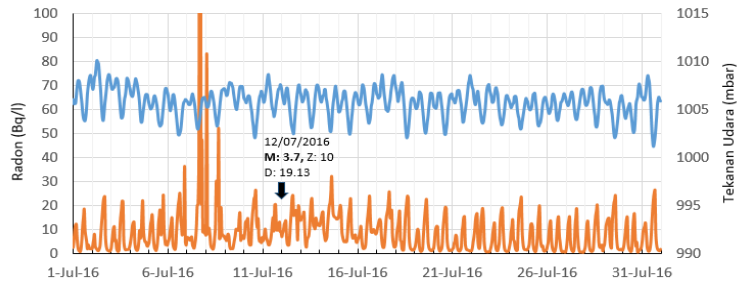
Yang terakhir adalah gempa bumi yang terjadi pada 27 Agustus 2016 (Gambar 11). Gempa bumi ini didahului oleh anomali perubahan harian radon dan tekanan udara sehari yaitu pada tanggal 16 Agustus. Setelah itu, grafik perubahan harian radon dan tekanan udara menunjukkan pola yang normal. Namun, pada tanggal 24 Agustus terjadi kenaikan konsentrasi radon yang kemudian menurun pada tanggal 26 Agustus, namun diikuti oleh kenaikan tekanan udara pada tanggal tersebut yang menurun setelah terjadinya gempa bumi 27 Agustus 2016.

Dari hasil analisis yang sudah dilakukan, dapat diketahui bahwa terjadi anomali radon yang diikuti dengan anomali perubahan harian radon dan tekanan udara terjadi sebelum 3 kejadian gempa bumi, yaitu gempa bumi 29 Februari 2016 dengan magnitudo 3.6, gempa bumi 23 Maret 2016 magnitudo 4.3, dan gempa bumi 27 Agustus 2016 dengan magnitudo 4.

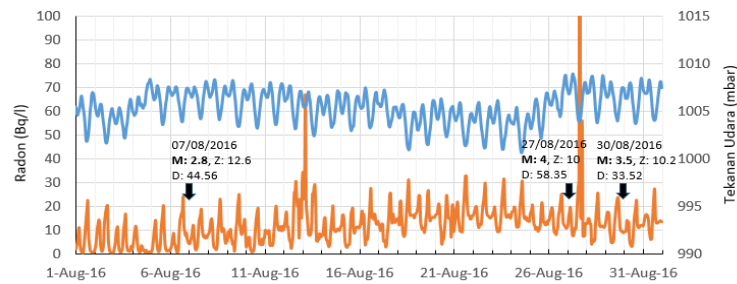


Gambar 3. Grafik nilai gas radon (garis oranye) dan tekanan udara (garis biru) di Stasiun Prekursor GempabumiTadulako dan gempabumi yang terjadi pada bulan (a) Februari, (b) Maret, (c) April, dan (d) Mei 2016.

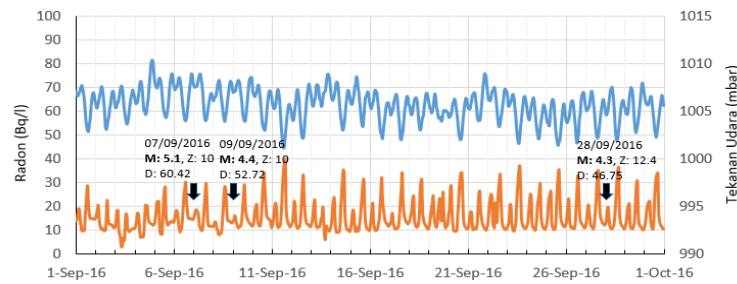




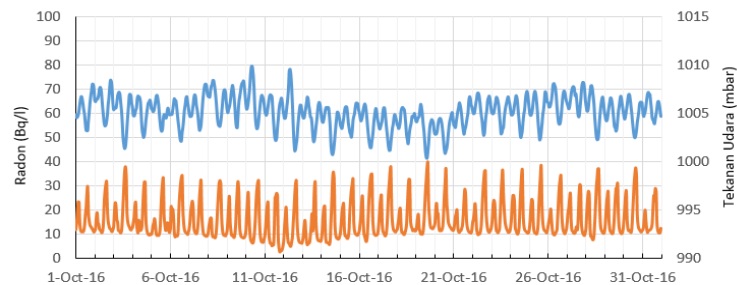
(b)



(c)

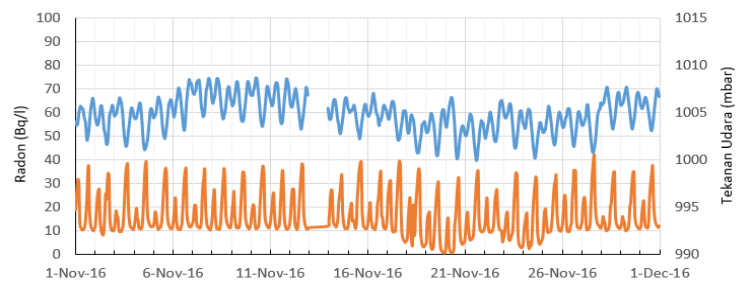


(d)

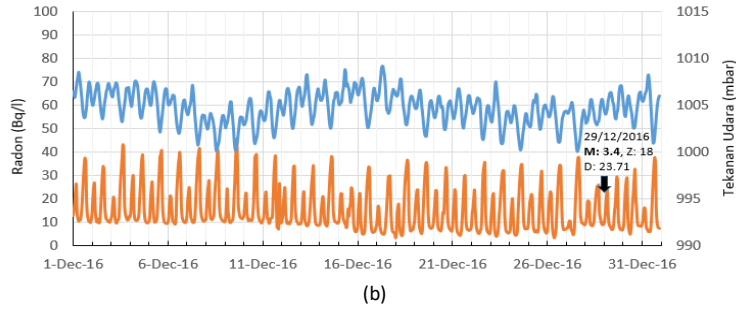


(e)

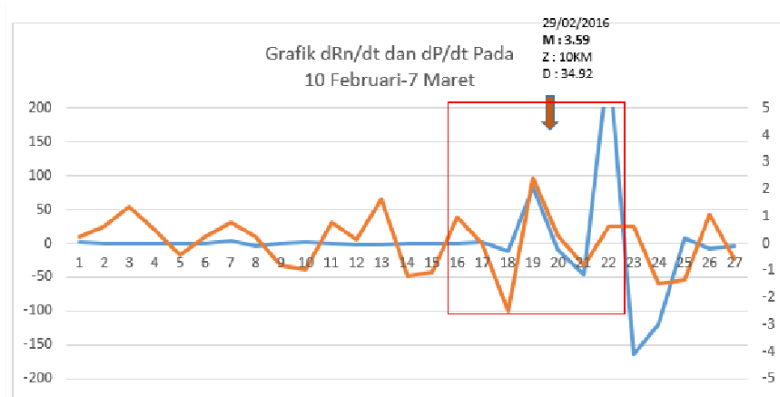
Gambar 4. Grafik nilai gas radon (garis oranye) dan tekanan udara (garis biru) di Stasiun Prekursor Gempabumi Tadulako dan gempa bumi yang terjadi pada bulan (a) Juni, (b) Juli, (c) Agustus, (d) September, dan (e) Oktober 2016.



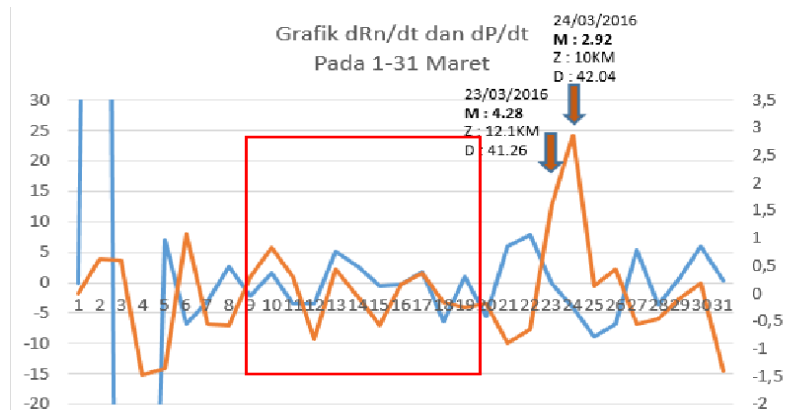
(a)



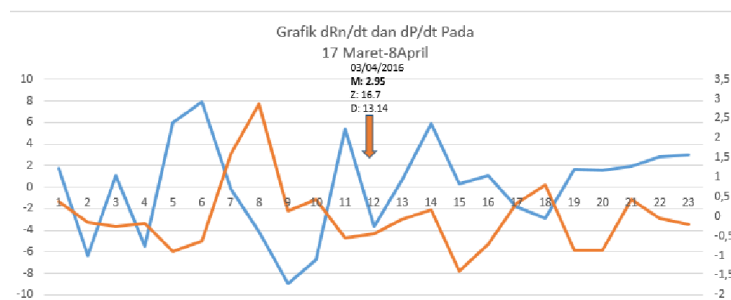
Gambar 5. Grafik nilai gas radon (garis oranye) dan tekanan udara (garis biru) di Stasiun Prekursor Gempabumi Tadulako dan gempabumi yang terjadi pada bulan (a) November, dan (b) Desember 2016.



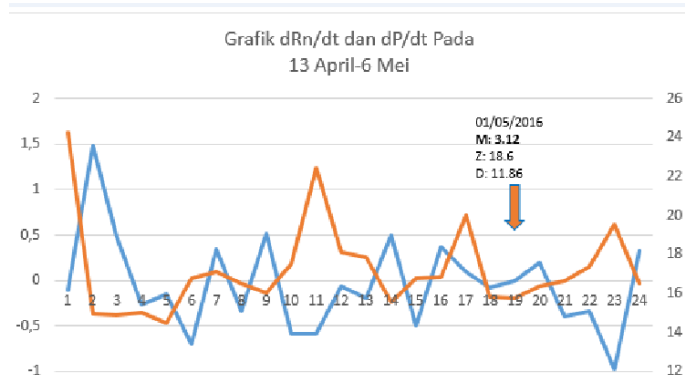
Gambar 6. Grafik perubahan harian radon (oranye) dan tekanan udara (biru) sebelum gempabumi tanggal 29 Februari 2016.



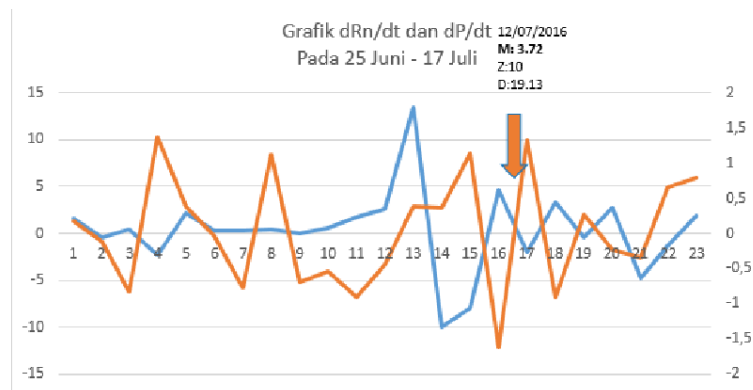
Gambar 7. Grafik perubahan harian radon (oranye) dan tekanan udara (biru) sebelum gempabumi tanggal 23 dan 24 Maret 2016.



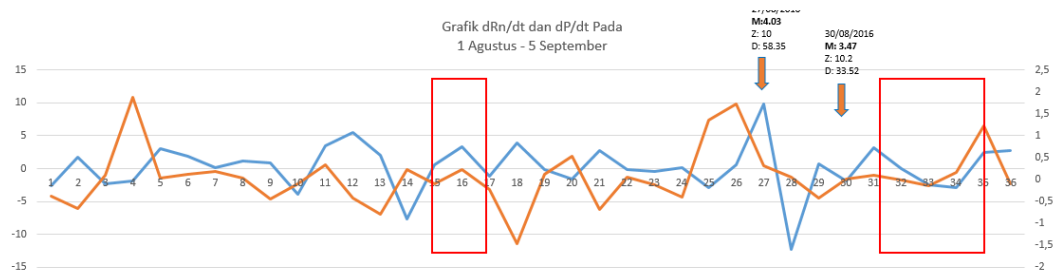
Gambar 8. Grafik perubahan harian radon (oranye) dan tekanan udara (biru) sebelum gempabumi tanggal 03 April 2016.



Gambar 9. Grafik perubahan harian radon (oranye) dan tekanan udara (biru) sebelum gempabumi tanggal 01 Mei 2016.



Gambar 10. Grafik perubahan harian radon (oranye) dan tekanan udara (biru) sebelum gempabumi tanggal 12 Juli 2016.



Gambar 10. Grafik perubahan harian radon (oranye) dan tekanan udara (biru) sebelum gempabumi tanggal 27 dan 30 Agustus 2016.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisis terhadap 92 kejadian gempabumi tahun 2016 yang berjarak kurang dari 100 km dari Stasiun Prekursor Tadulako, maka terdapat 17 kejadian gempabumi yang kemungkinan ada prekursor anomali radon. Menggunakan anomali dua kali standar deviasi, didapatkan bahwa 12 kejadian gempabumi diawali dengan prekursor anomali radon. Setelah diterangkan analisa lanjutan yaitu

anomali perubahan radon dan tekanan udara harian, maka hanya 3 dari 12 kejadian yang diikuti anomali ini. Adanya dua anomali radon ini menambah tingkat kepercayaan bahwa anomali yang terjadi merupakan prekursor gempabumi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Para penulis adalah kontributor utama dan memberikan kontribusi yang sama selama pengolahan, analisis dan penulisan

makalah. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG atas dukungan selama penulis melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahadi, S., Puspito, N. T., Saroso, S., Ibrahim, G., Siswoyo, & Suhariyadi. (2013). *Prekursor Gempa Bumi Padang 2009 Berbasis Analisis Power Rasio dan Fungsi Transfer Tunggal*. Jurnal Ilmiah Geomatika, Badan Informasi Geospasial. 49-56.
- Ahadi, S., Puspito, N. T., Ibrahim, G., & Saroso, S. (2014). *Determination of The Onset time in Polarization Power Ratio Z/H for Precursor of Sumatra Earthquake*. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, Maryland, 75-78.
- Ahadi, S., Puspito, N. T., Ibrahim, G., Saroso, S., Yumoto K., Yoshikawa, A., & Muzli. (2015). *Anomalous ULF Emission and Their Possible Association with the Strong Earthquakes in Sumatera, Indonesia during 2007-20012*. J. Math. Fund. Sci. Institut Teknologi Bandung, 84-103.
- Chetiaa, T., Baruah, S., Baruah, S., Deya, C., & Sharma, S. (2020). *Weibull distribution analysis of precursory time due apparent resistivity anomaly prior to earthquakes in the vicinity of multi-parametric geophysical observatory, Tezpur, India*. Geomatics, Natural Hazard and Risk. Vol. 11, No. 1, 1093-1114.
- Fielding, E.J., Lundgren, P.R., Burgmann, R., Funning, G. J. (2008). *Shallow Fault-Zone Dilatancy Recovery after the 2003 Bam Earthquake in Iran*. Nature 458, 64-68.
- Fu, C.C., Yang, T.F., Tsai, M.C., Lee, L.C., Liu, T. K., Walia, V., Chen, C. H., Chang, W. Y., Kumar, A., Lai, T. H. (2017). *Exploring the relationship between soil degassing and seismic activity by continuous radon monitoring in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan*. Chemical Geology, Vol. 469, 163-175.
- Hattori, K., Serita, A., Yoshino, C., Hayakawa, M., & Isezaki, N. (2006). *Singular Spectral analysis and principal component analysis for signal discrimination of ULF geomagnetic data associated with 2000 Izu Island Earthquake Swarm*. Physics and Chemistry of the Earth. 31, 281-291.
- Hatuda, Z. (1953). *Radon content and its change in soil air near the ground surface*. Memoirs of the College of Science, University of Kyoto, Series B 20, 285-306.
- Hauksson, E., and Goddard, J. G. (1981). *Radon Earthquake Precursor Studies in Iceland*. J. Geophys. Res., 86, 7037-7054.
- Hayakawa, M., & Hobar, Y. (2010). *Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction*. Geomatics, Nat. Hazards Risk, 1(2), 115-155.
- Hayakawa, M., Hattori, K., & Ohta, K. (2007). *Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) Geomagnetic Variation Associated with Earthquakes*. Sensors, 7, 1108-1122.
- Hayakawa, M., Itoh, T., Hattori, K., & Yumoto, K. (2000). *ULF electromagnetic precursor for an earthquake at Biak Indonesia on February 17, 1996*. Geophysic Research Letter, 27, 1531-1534.
- Hirota, U., Moriuchi, H., Takemura, Y., Tsuchida, H., Fujii, I., Nakamura, M. (1988). *Anomalous high radon discharge from the Atotsugawa fault prior to the western Nagano Prefecture earthquake (M 6.8) of September 14, 1984*. Tectonophysics 152 No 1-2, 147-152.
- Iakovleva, V.S., Ryzhakova, N. K. (2003). *Spatial and Temporal Variations of Radon Concentration in Soil Air*. Radiat. Meas. 36, 385-388.
- Ibrahim, G., Ahadi, S., & Saroso, S. (2012). *Karakteristik Sinyal Emisi ULF yang Berhubungan dengan Prekursor Gempabumi di Sumatera, Studi Kasus: Gempabumi Padang 2009 dan Gempabumi Mentawai 2010*.

- Igarashi, G., & Wakita, H. (1990). Groundwater Radon Anomalies Associated With Earthquakes. *Tectonophysics*, 180:2-4.
- Li, Y.G., Chen, P., Cochran, E.S., Vidale, J. E., Burdette, T. (2006). Seismic Evidence for Rock Damage and Healing on the San Andreas Fault Associated with the 2004 M 6.0 Parkfield Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, S349-S363.
- Liu, J. Y., Tsai, H. F., and Jung, T. K. (1996). Total Electron Content Obtained By Using the Global Positioning System. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 7, 107-117.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., Tsai, Y. B., and Chuo, Y. J. (2000). Seismo-Ionospheric Signatures Prior to $M \geq 6.0$ Taiwan Earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3113-3116.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., & Tsai, H. F. (2001). Variations of Ionospheric Total Electron Content During the Chi-Chi Earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1383-1386.
- Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Pulinets, S. A., Tsai, H. F., and Zeng, X. P. (2002). A Study on the TEC Perturbations Prior to the Reili, Chi-Chi and Chia-Yi Earthquakes, *Seismo Electromagnetics: Lithosphere Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Edited by Hayakawa, M. and Molchanov, O. A., TERRAPUB, Tokyo, 297-301.
- Mair, K., & Abe, S. (2008). 3D Numerical Simulations of Fault Gouge Evolution during Shear: Grain Size Reduction and Strain Localization. *Earth Planet. Sci. Lett.* 274, 72-81.
- Molchanov, O. A., & Hayakawa, M. (2008). *Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results*, Terra Scientific Publishing, Tokyo, 189 pp.
- Muslim, B. (2015). Pengujian Teknik korelasi untuk deteksi pengaruh aktivitas gempa bumi pada ionosfer. *Jurnal Sains Dirgantara* 12 87-101.
- Pakpahan, S., Nurdiyanto, B., & Ngadmanto, D. (2014). Analisis Parameter Geofisika Atmosferik dan Geokimia Sebagai Prekursor Gempa Bumi Di Pelabuhan Ratu, Sukabumi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol 15, No 2.
- Prayogo, A. S., Pakpahan, S., Sunardi, B. (2015). Assesment of Electromagnetic and Radon Concentration as Earthquake Precursors. *Proceeding of The 5th Annual Basic Science International Conference*, 77-80.
- Prayogo, A. S., Ngadmanto, D., Rohadi, S., Sakya, A. E. (2017). The Utilization Potential of Radon as Earthquake Precursor in Indonesia. *Proceeding of The 7th Annual Basic Science International Conference*, 203-206.
- Pulinets S. A., Legen'ka, A.D., Alekseev V. A. (1994). Pre-Earthquake Ionospheric Effects and their Possible Mechanisms. In: Kikuchi H. (eds) *Dusty and Dirty Plasmas, Noise, and Chaos in Space and in the Laboratory*. Springer, Boston, MA.
- Pulinets, S. A.: Seismic activity as a source of the ionospheric variability, *Adv. Space Res.*, 22, 6, 903-906, 1998.
- Pulinets, S. A., Boyarchuk, K. A., Hegai, V. V., Kim, V. P., & Lomonosov, A. M. (2000). Quasielectrostatic Model of Atmosphere-Thermosphere-Ionosphere Coupling, *Adv. Space Res.*, 26, 8, 1209-1218.
- Pulinets, S. A., Boyarchuk, K. A., Hegai, V. V., & Karelin, A. V. (2002). Conception and model of Seismo-Ionosphere magnetosphere Coupling, in *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Edited by Hayakawa, M. and Molchanov, O. A., TERRAPUB, Tokyo, pp. 353-361.
- Rikitake, T. (2001). *Predictions and Precursors of Major Earthquakes: The Science of Macroscopic Anomalous Phenomena*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 198 pp.
- Scholz, C.H., Sykes, L.R., & Aggarwal, Y.P. (1973). *Earthquake prediction: a physical basis*. *International Sci.*, 181, h.803 - 810.

- Sunardi, B., Muslim, B., Sakya, A. E., Rohadi, S., Sulastri, Murjaya, J. (2018a). Ionospheric earthquake effects detection based on Total Electron Content (TEC) GPS. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 132 (2018) 012014.
- Sunardi, B., Rohadi, S., Muslim, B., Ngadmanto, D., Susilanto, P., Sulastri, Pakpahan, S., Kurniawan, T., Prayogo, A. S. (2018b). Variasi Gas Radon dan Aktivitas Kegempaan di Sekitar Patahan Opak. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi, Vol. 9, No. 1, April 2018: 11 – 20.
- Sunardi, B., and Sulastri. (2016). Pemantauan anomali Total Electron Content (TEC) berkaitan dengan kejadian gempabumi di sekitar wilayah Jawa tahun 2015 SPEKTRA: Jurnal Fisika dan Aplikasinya 1 (2) 95-102.
- Sunardi, B., Sakya, A. E., Masturyono, Rohadi, S., Ngadmanto, D., Sulastri, Susilanto, P., Pakpahan, S. (2016). Real Time Observation System for Earthquake Precursors Study in Yogyakarta. Proceedings Jogja Earthquake in Reflection 2016.
- Sunardi, B., Muslim, B., & Pakpahan, S. (2015). Anomali Total Electron Content (TEC) sebelum gempabumi kuat di Indonesia Tahun 2014. Prosiding Seminar Nasional Jurusan Fisika FMIPA Unesa Surabaya.
- Ulomov, V. I., Zakharov, A. I., & Ulomova, N. V. (1967). *Tashkent earthquake of April 26, 1966, and its aftershocks*. AkadNauk SSSR, Geophysic 177, 567-570.
- Uyeda, S., Nagao, T., & Kamogawa, M. (2008). *Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics*. Tectonophysics, 470, 205–213.
- Wakita, H. (1996). *Geochemical Challenge to Earthquake Prediction*. Proc Natl AcadSci USA, 93:3781–3786.